

Dynamische Drehmomentregelung eines Geschalteten Reluktanzantriebs auf Basis eines Echtzeitmodells

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität der Bundeswehr München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Marc Hiller

Neubiberg
2008

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. habil. Claus Hillermeier

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Marquardt

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog

Tag der Prüfung: 10. Juni 2008

Forschungsberichte Leistungselektronik und Steuerungen

Band 2

Marc Hiller

**Dynamische Drehmomentregelung eines
Geschalteten Reluktanzantriebs auf Basis
eines Echtzeitmodells**

Shaker Verlag
Aachen 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7661-4

ISSN 1867-5700

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Leistungselektronik und Steuerungen an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Marquardt für die Betreuung meiner Promotion. Die vorliegende Arbeit wäre ohne seinen großen Erfahrungsschatz und die vielen wertvollen Diskussionen nicht möglich gewesen. Besonders möchte ich mich auch für die weit reichenden Freiheiten bei der Bearbeitung der vielfältigen Aufgaben in meiner Assistentenzeit bedanken. Von den dabei gemachten Erfahrungen werde ich sicher noch lange profitieren können.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog als Koreferent und Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Claus Hillermeier als Vorsitzenden des Prüfungsausschusses danke ich herzlich für ihre Unterstützung und das der Arbeit entgegengebrachte Interesse.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Elektrische Antriebstechnik, sowie bei allen Diplom- und Studienarbeitern, ohne die diese Arbeit so nicht möglich gewesen wäre. Die gute Zusammenarbeit in Büro, Labor und Werkstatt wird mir immer in besonderer Erinnerung bleiben und hat den Abschluss der Arbeit in diesem Umfang erst ermöglicht.

Meiner Familie möchte ich für ihre große Unterstützung und die viele Geduld im Laufe dieser Zeit danken. Wobei auch die technische Unterstützung nicht vergessen werden darf: Wer hätte gedacht, dass Reluktanzmaschinen etwas mit der Kinetik von Enzymreaktionen gemeinsam haben ...

Inhalt

1	EINLEITUNG.....	1
2	LEISTUNGSELEKTRONISCHE STELLGLIEDER FÜR GESCHALTETE RELUKTANZMASCHINEN	5
2.1	Konventionelle Stromrichtertopologien.....	7
2.1.1	Stromrichter mit asymmetrischen Halbbrücken.....	8
2.1.2	Multilevel-Umrichter mit asymmetrischen Halbbrücken.....	11
2.1.3	5-Level asymmetric converter (5LAC)	16
2.2	Neuartige Stromrichtertopologie für Geschaltete Reluktanzantriebe	18
2.2.1	Neuartige Phasenbausteine	19
2.2.2	Ausführungsbeispiele	23
2.2.3	Eigenschaften und Vorteile.....	28
3	ECHTZEITMODELL DER GESCHALTETEN RELUKTANZMASCHINE	37
3.1	Modellbildung bei Geschalteten Reluktanzmaschinen	38
3.1.1	Wichtige Gesichtspunkte für die Modellbildung.....	40
3.2	Modelle für die Simulation Geschalteter Reluktanzmaschinen	43
3.2.1	Modelle basierend auf Datentabellen	44
3.2.2	Analytische Modelle basierend auf Geometriedaten	46
3.2.3	Analytische Modelle basierend auf den Magnetisierungskennlinien	46
3.3	Neuartiges Echtzeitmodell für die dynamische Drehmomentregelung von Geschalteten Reluktanzmaschinen	51
3.3.1	Neuartiges Gage Curve Modell	52
3.3.2	Prinzipieller Aufbau des Maschinenmodells	52
3.3.3	Nachbildung der Kurven für die unaligned und aligned Position	55
3.3.4	Nachbildung der Gage Curves.....	59
3.3.5	Gage Curve Modell am Beispiel des Erprobungsträgers SRM301	70
3.4	Anwendungen des Maschinenmodells.....	76
3.4.1	Berechnung des Phasenstroms in der Simulation	78
3.4.2	Berechnung des Drehmoments aus Phasenstrom und Rotorlage in der Simulation und Echtzeitregelung	82
3.4.3	Berechnung des Phasenstroms aus Drehmoment und Rotorlage in der Simulation und Echtzeitregelung	94
3.5	Berücksichtigung der Maschinenverluste in der Simulation und Echtzeitregelung ..	97

3.5.1 Berücksichtigung der Maschinenverluste bei der Berechnung des Phasenstroms in der Simulation	98
3.5.2 Berücksichtigung der Maschinenverluste bei der Berechnung des Drehmoments	115
3.6 Variables Hystereseband für konstante Schaltfrequenzen	125
3.6.1 Berechnung der rotatorischen Spannung U_{rot}	130
3.6.2 Berechnung der differentiellen Induktivität L_{diff}	131
3.6.3 Messergebnisse mit variabler Hysteresebreite	132
 4 DREHMOMENTREGELUNG DER GESCHALTETEN RELUKTANZMASCHINE. 135	
4.1 Verfahren zur Reduzierung der Drehmomentwelligkeit	136
4.1.1 Konstruktive Maßnahmen	136
4.1.2 Regelungstechnische Maßnahmen	138
4.2 Betriebsbereiche der Drehmomentregelung	144
4.3 Drehmomentregelung im unteren Drehzahlbereich	151
4.3.1 Regelungskonzept	151
4.3.2 Schaltzustände im unteren Drehzahlbereich	153
4.3.3 Betriebsverhalten im unteren Drehzahlbereich	157
4.4 Drehmomentregelung im oberen Drehzahlbereich	168
4.4.1 Pulsmuster im oberen Drehzahlbereich	169
4.4.2 Regelungskonzept	172
4.4.3 Berechnung der Schaltwinkel	174
4.4.4 Betriebsverhalten im oberen Drehzahlbereich	178
 5 ZUSAMMENFASSUNG	191
 6 LITERATURVERZEICHNIS	193
 7 ANHANG	199
7.1 Maschinendaten der Testmaschine	199
7.2 Praktische Vorgehensweise zur Bestimmung der Gage Curve Parameter	201
7.3 Verwendete Formelzeichnungen, Indizes und Abkürzungen	204
7.3.1 Formelzeichen	204
7.3.2 Indizes	206
7.3.3 Abkürzungen	207